

## Формирование широкой доменной границы при локальном облучении электронным и ионным пучками в монокристаллах ниобата бария-стронция

В.А. Шихова<sup>1</sup>, А.С. Нураева<sup>1</sup>, Д.С. Чезганов<sup>1</sup>, Е.А. Пашнина<sup>1</sup>, М.С. Небогатилов<sup>1</sup>,  
Е.Д. Грешняков<sup>1</sup>, А.П. Турыгин<sup>1</sup>, В.А. Аникин<sup>1</sup>, Л.И. Ивлева<sup>2</sup>, В.Я. Шур<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, 620000, Екатеринбург, Россия*

*vera@urfu.ru*

<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991, Москва, Россия*

Было исследовано формирование широкой доменной границы при локальном переключении поляризации в результате облучения пучком электронов и ионов средних энергий в монокристаллах ниобата бария-стронция (SBN) с исходной лабиринтовой нанодоменной структурой [1, 2]. Использовались пять режимов облучения: (1) точечное дискретное облучение с расстоянием между точками более 100 мкм; (2) матричное дискретное облучение матрицами из точек 3×3 и 5×5 при расстоянии между точками 7 и 15 мкм; (3) непрерывное облучение полосами с периодом 7 мкм; (4) непрерывное облучение квадратов размером 50×50 мкм<sup>2</sup>; (5) линейное облучение для создания доменов сложной формы по заданному шаблону. Полосовое облучение проводилось вдоль кристаллографических осей Y, X и под 45° к Y. Доменные структуры визуализировались на поверхности кристаллов с помощью силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика. Конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния [3] и генерация второй гармоники по типу Черенкова [4] использовались для визуализации доменов в объеме кристаллов.

В результате точечного облучения электронным и ионным пучками формировались изолированные домены круглой формы, окруженные кольцевой частично переключенной областью с субмикронной лабиринтовой доменной структурой - широкой доменной границей (ШДГ) (Рис. 1а). Для характеристики ШДГ была рассчитана зависимость усредненной поляризации от расстояния от точки облучения (Рис. 1б) и получена дозовая зависимость ширины ШДГ (Рис. 1в). Формирование ШДГ для переключения из полидоменного состояния электронным и ионным пучками происходит при воздействии неоднородного электрического поля, таким образом ШДГ представляет собой область со значением полярной компоненты электрического поля между пороговыми полями для полного и частичного переключения.

С помощью модели точечных зарядов было рассчитано пространственное распределение Z-компоненты электрического поля, создаваемого инжектированным зарядом в объеме кристалла [5]. Величина поля вблизи облучаемой поверхности уменьшается при удалении от точки облучения, что качественно совпадает с образованием вокруг полностью переключенного домена области с частичным переключением.

Изотропный рост (круглая форма) доменов обусловлен генерацией ступеней на доменной стенке в результате слияния с исходными изолированными нанодоменами. Площадь изолированных доменов, сформированных при облучении электронным пучком пропорциональна дозе облучения. При матричном облучении наблюдалось насыщение зависимости площади доменов от дозы, обусловленное взаимодействием сближающихся доменных стенок. При облучении ионным пучком с высокой дозой и небольшим расстоянием между точками в матрице форма доменов искажалась. Площадь доменов, полученных в результате облучения ионным пучком, пропорциональна дозе облучения и не зависит от расстояния между точками. Кроме того, для облучения ионным пучком была определена зависимость переключенного заряда от дозы облучения и получено, что эта зависимость носит линейный характер с наклоном 0,7. Этот факт подтверждает определяющую роль инжектированных ионов в экранировании деполяризующего поля.

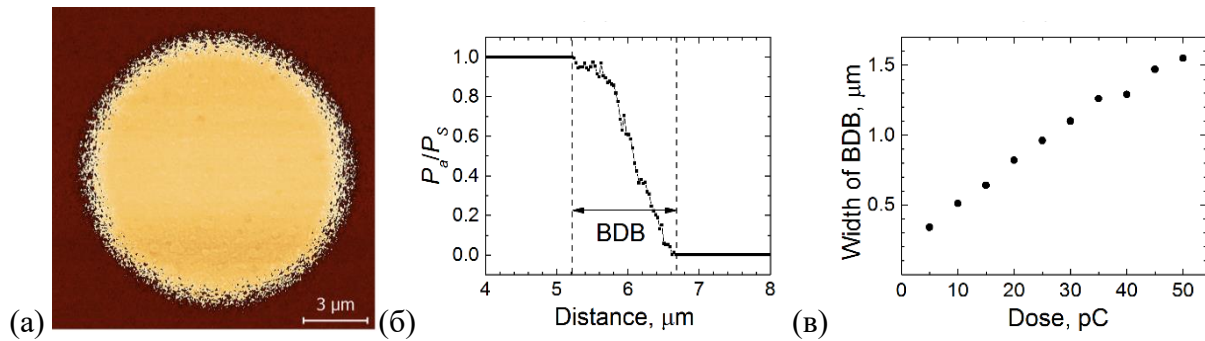


Рисунок 1. (а) СМПО изображение изолированного домена с ШДГ при точечном облучении ионным пучком. Доза 45 пКл. Сигнал - фаза. (б) Нормированная средняя поляризация  $P_a/P_s$  в зависимости от расстояния от облучаемой точки, вычисленная для а. (в) Зависимость ширины ШДГ от дозы.

При полосовом облучении формировалась периодическая полосовая доменная структура с ШДГ. Ширина доменов линейно увеличивалась при увеличении дозы облучения с насыщением при высоких дозах. Одинаковая ширина доменов при облучении вдоль Y и X кристаллографических направлений обусловлена симметрией кристалла  $C_{4v}$ . Минимальное расстояние между стенками соседних доменов, созданных полосовым облучением электронным пучком под углом  $45^\circ$  к Y, заметно больше, чем вдоль Y. При облучении ионным пучком минимальное расстояние было одинаковым для полос, ориентированных вдоль Y, и под  $45^\circ$  к Y направлению.

При визуализации доменов, сформированных в результате точечного облучения, в объеме кристалла было обнаружено, что вблизи поверхности (до 25 мкм) радиус домена практически постоянен, с глубиной наблюдалось уменьшение радиуса домена и увеличением ширины ШДГ. Частичное переключение наблюдалось намного глубже (до 75 мкм при облучении электронным пучком и до 290 мкм при облучении ионным пучком). Наблюдаемая доменная структура в объеме согласуется с расчетным пространственным распределением полярной компоненты электрического поля. Глубина полосовых доменов достигала 90 мкм при облучении электронным пучком и 100 мкм при облучении ионным пучком. Наблюдалось слияние доменов в объеме при облучении ионным пучком как точечного при небольшом расстоянии между доменами, так и полосового с высокой дозой.

Наблюдаемый изотропный рост доменов может представлять интерес для создания доменных структур сложной геометрии. Используя линейное облучение, получены полосовые домены, ориентированные в произвольном направлении, и домены произвольной формы. Оптимизация доз облучения позволила создавать сквозные квадратные монодоменные области.

Выявлено качественное различие между ростом доменов в монодоменном и полидоменном кристаллах. В полидоменном кристалле генерация ступенек на стенках является результатом слияния стенок с нанодоменами, причем рост домена на любой глубине определяется пространственным распределением приложенного поля в объеме. Такой механизм роста доменов ограничивает глубину изолированных доменов и приводит к образованию ШДГ перед движущейся доменной стенкой. Полученный эффект может быть использован для создания в полидоменных кристаллах трехмерных доменов (3D-доменная инженерия) и доменных структур произвольной формы для управляемых дифракционных оптических элементов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-10160). Использовано оборудование УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ.

1. D.S. Chezganov et al., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics. Freq. Contr.*, **67** (1), 191-196 (2020).
2. V.A. Shikhova et al., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics. Freq. Contr.*, **68** (8), 2824-2831 (2021).
3. P.S. Zelenovskiy et al., *Ferroelectrics*, **439** (1), 33-39 (2012).
4. Y. Sheng et al., *Opt. Express*, **18** (16), 16539-16545 (2010).
5. E.J. Mele, *Am. J. Phys.*, **69** (5), 557-562 (2001).